

Rapport de recherche
Programme de recherche et d'innovation dans les transports terrestres
Convention n° XXXXX



Sous la direction scientifique de
Jean P. Antoni et Pierre Frankhauser

Auteurs

Jean P. Antoni, Cécile Tannier, Gilles Vuidel et Joanne Hirtzel

avec la participation de

Marion Lamiral, Yann Fléty, Maxime Frémond, Julien Aubé, Jean-Baptiste Aupet, Marc Bourgeois, Mehdi Iraqi, Grégori Rochet, Maxime Carvahlo, Jérémie Doyon et Léa Garcia



Novembre 2011

Université de Franche-Comté
Laboratoire ThéMA

Table des matières

I. Introduction	7
II. Modélisation des données (Modules D)	19
1. Population et logement (D1)	23
2. Graphes et réseaux (D2)	27
3. Aménités urbaines et périurbaines (D3)	29
III. Modélisation des processus (Modules P)	31
4. Evolutions démographiques (P1)	33
5. Distribution des mobilités (P21)	35
6. Choix modal (P22)	37
7. Affectation sur les réseaux (P23)	39
8. Mobilité résidentielle (P41)	41
9. Construction (P42)	43
IV. Modélisation des impacts (Modules I)	45
10. Congestion (I11)	47
11. Accessibilité (I12)	49
12. Emissions de polluants (I31)	51
13. Consommation énergétique (I32)	53
14. Nuisances sonores (I33)	55

V. Conclusion

57

Préambule

JE REBONDIS ici sur une remarque de Gérard Brun, formulée en *off* lors du Carrefour à mis-parcours du PREDIT 4 à Bordeaux en mai 2011, à l'issue d'une intervention que je faisais sur la modélisation urbanisation/transport en France. Cette remarque portait sur la modestie du discours, modestie qui doit certes permettre de relativiser le travail réalisé par la recherche française en sciences humaines depuis les deux dernières décennies et de positionner ses résultats dans le cadre d'un débat scientifique, mais qui contribue dans le même temps à noyer ces résultats dans une humilité relative qui ne met pas directement en avant la portée expérimentale, donc les possibilités d'application concrète (en matière d'aide à la décision notamment) des modèles présentés, même les plus aboutis.

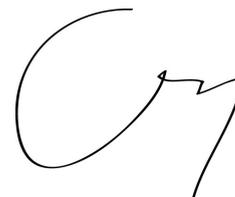
En lisant le présent rapport, de nombreux lecteurs feront probablement la même remarque, insistant sur l'emploi presque immodéré du conditionnel pour conjuguer des verbes déjà prudents en eux-mêmes, d'expressions "molles" comme "semble-t-il" ou "possiblement", et l'abondance notable d'adjectifs comme "délicat" ou "difficile". L'emploi du verbe "être" est quant à lui réduit au strict minimum, et sa dimension "universelle" souvent remplacée par une position plus nominaliste, du genre "il nous apparaît comme"...

Certains auraient été plus francs du collier ; je préfère rester sur mes positions. Ce qui ne veut dire que le projet MobiSim n'est qu'une succession d'incertitudes ou de choix hasardeux. Bien au contraire, dans son état d'avancement actuel, il apparaît comme une synthèse de la majorité des avancées réalisées depuis une quarantaine d'année dans le domaine international de la modélisation des transports et de l'urbanisation, qui aboutit à une plateforme de modélisation informatique opérationnelle. Une nouvelle phase peut alors s'ouvrir : celle des applications, auxquelles seront consacrées les années 2012 et 2013.

Ces applications ne trouveront toutefois leur réelle pertinence, en terme de simulation et de prospective territoriale, que si les biais et les incertitudes qui conditionnent l'intégration complète de scénarios réalistes dans MobiSim sont clairement identifiés et évalués en conséquence. La modélisation est une simplification de la réalité, qui permet de mieux en comprendre certaines parties ; mais le monde réel n'est ni simple ni décomposable en réalités distinctes. Par son manque de prudence, l'exercice a connu de nombreux échecs par le passé, qui contribuent encore à discréditer les efforts réalisés aujourd'hui. Ici, le doute est certainement meilleur allié que la certitude, et le conditionnel s'impose.

Que le lecteur se rassure, donc, la caravane semble avancer, ce que les années à venir devraient confirmer... Conditionnel, quand tu nous tiens !

Jean-Philippe Antoni



Remerciements

Le développement de MobiSim dans son état d'avancement actuel a été largement facilité par le travail coopératif qui s'est mis en place à travers les réunions du comité de pilotage¹ qui a suivi la modélisation durant plus de deux ans. Aussi, nous tenons à remercier ici l'ensemble des membres de ce comité pour les conseils avisés, souvent cruciaux pour le développement du modèle, en particulier Yves Crozet, Damien Verry et Philippe Casanova. Nous adressons également nos remerciements à Gérard Brun pour l'aide précieuse qu'il a pu apporter en terme de contacts et téléguidage au sein des arcanes du Ministère et des différentes institutions impliquées dans la modélisation urbanisation/transport.

1. La liste des membres du comité de pilotage, ainsi que celle des membres du groupe de travail et des spécialistes consultés au titre d'experts est disponible dans la rubrique "Equipe" du site www.mobisim.org.

Première partie .

Introduction

CETTE INTRODUCTION vise à présenter un certain nombre de généralités sur le modèle MobiSim dans son état actuel de développement. Ces généralités apparaissent nécessaires dans la mesure où la structure très technique du présent rapport, qui déroule les uns après les autres les modules de MobiSim tels qu'ils sont aujourd'hui intégrés dans le programme, ne laisse que peu de place à la description des liens qui existent entre ces modules, liens que le lecteur ne pourra certainement saisir qu'un filigrane et par recoupements à travers les différents chapitres. L'introduction vise à pallier cette difficulté, au moins *a minima*, en précisant également les orientations stratégiques qui fondent les spécificités du modèle. Dans un premier point (i), il convient donc de rappeler l'historique de MobiSim et de présenter son point d'arrivée actuel, en lien avec les résultats attendus, initialement associés aux objectifs du PREDIT qui l'a financé. Dans un deuxième point (ii), l'architecture du modèle est présentée de manière très générale comme l'association des modules qui le composent, regroupés par objectifs : initialisation des données, modélisation des processus, estimation des impacts et visualisation des résultats. Dans un troisième point (iii), nous rappelons la manière avec laquelle la question des données, considérée comme cruciale (Antoni, 2010)², est prise en compte dans le programme ; les données y sont présentées comme une source indispensable pour l'initialisation de la modélisation, mais également pour sa validation, ce qui demande à clarifier leur rôle et leur contenu, et de faire les choix associés. Enfin, le quatrième point (iv) présente le fonctionnement itératif du modèle dans le moyen et le long terme, en insistant sur l'articulation des processus rapides (mobilité quotidiennes) et lents (mobilités résidentielle) qui y sont pris en compte, en lien avec les évolutions socio-démographiques de la population dans les territoires pour lesquels les simulations sont effectuées.

i. Passé et présent

Le projet de simulation des mobilités MobiSim est développé depuis les années 2000, et a fait l'objet d'améliorations constantes, souvent initiées et financées par le Ministère³ et par l'ADEME⁴, notamment dans le cadre du PREDIT, pour répondre à des problématiques correspondant à leurs préoccupations sur les questions d'urbanisation et de politiques de transport d'une part, et pour fournir un outil d'aide à la décision aux collectivités locales et aux aménageurs d'autre part. Dans ce contexte, le projet MobiSim a toujours visé à explorer le lien entre la forme des villes et les mobilités quotidiennes et résidentielles qui y prennent place. Depuis 2007, sa propriété et son développement ont été transférés de la société ATN⁵, qui en assurait le suivi jusqu'alors, au laboratoire de géographie THÉMA (UMR 6049 du CNRS et de l'Université de Franche-Comté), où il a trouvé une nouvelle équipe de modélisation et de développement. Ce transfert a donné lieu à une refonte importante du programme existant et à des évolutions majeures, dont les raisons ont été

2. On se référera plus précisément à la conclusion de l'ouvrage *Modéliser la ville* (pp. 425-428) qui insiste sur la difficulté de disposer de données adéquates (dans l'espace comme dans le temps) pour nourrir les modèles de simulation, mais également pour valider leurs résultats.

3. Par souci de simplification, nous employons le mot Ministère pour désigner le MEDMT, anciennement MEEEDDAT, anciennement Ministère de l'équipement.

4. L'ADEME est l'Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie. Elle apparaît comme l'un des financeurs historiques du projet MobiSim. Durant les dernières années, elle a notamment financé deux projets de recherches importants pour le développement du programme : le projet "Vers des indicateurs locaux de performance énergétique : les étiquettes énergétiques territoriales" (2009) et le projet "Bruit, mobilités et aménagements urbains : vers une modélisation des impacts" (2010-2011) qui s'achève au moment où le présent rapport est sous presse, et auquel il est fait référence dans la troisième partie de ce rapport.

5. La société ATN (Application des techniques nouvelles) est un bureau d'étude privé dirigé jusqu'en 2007 par Philippe Casanova, et spécialisé dans les questions de mobilité urbaine et de modélisation.

explicitées dans un précédent rapport de recherche pour le compte du Ministère⁶. Il a également conduit à rebaptiser le projet, qui est devenu MobiSim-ThéMA dans sa version 0.1 en 2007, et que nous appellerons ici simplement MobiSim.

Le présent projet de recherche, intitulé "De MobiSim 0.1 à MobiSim 0.2", avait comme objectif de départ d'approfondir la problématique des mobilités par une modélisation avancée, notamment en ce qui concerne la question du choix modal et des mobilités résidentielles, jusqu'alors intégrée de manière relativement simple. Cet objectif, qui devait permettre de passer de la version 0.1 à 0.2, est globalement atteint puisque d'une part, le choix modal est aujourd'hui implémenté selon un modèle comportemental de choix basé sur la calcul d'un coût généralisé des différentes options de transport, intégrant la problématique du choix modal de manière quasi-exhaustive, et que, d'autre part, à la logique directement issue des automates cellulaires utilisée pour simuler les mobilités résidentielles, a été substituée une approche *push-pull*, qui fait intervenir les notions de "préférence" et de "propension à l'action", en prenant mieux en compte le parc de logements disponibles et ses caractéristiques.

Toutefois, pour être intégrées correctement sur le plan conceptuel comme sur le plan informatique, ces modifications ont engendré une refonte importante de plusieurs composantes du modèle. En particulier, la population synthétique utilisée comme une base d'agents pour les simulations individus-centrées a du être améliorée. Elle intègre désormais une caractérisation étendue des individus et des ménages, localisés avec précision à l'échelle des bâtiments, ce qui correspond à une nouvelle ontologie "agent/espace" propre à MobiSim. Dans le même esprit, la génération du trafic, jusqu'à présent calculée par un comptage des populations et de leur situation socio-économique, est désormais estimée à travers une approche basée sur les activités (*activity-based approach*). De par ces modifications, l'actuelle version du programme a dépassé la version 0.2 et de présenter ici la version XXX de MobiSim-ThéMA⁷.

Parallèlement, ces évolutions permettent aujourd'hui de reconsidérer la position de MobiSim sur un plan épistémologique, à l'échelle internationale de la modélisation urbanisation/transport. A ce niveau, le modèle peut en effet revendiquer sa place au sein des modèles dits LUTI (*Land-use and transport integrated*), dont il apparaît comme un développement particulier et original pour trois raisons⁸ :

6. Ce rapport, intitulé "Appropriation et développement par ThéMA : vers une modélisation multiscalair du développement urbain par système multi-agent", clôturant la convention 07 MT S 032 avec la Direction de la recherche et de l'innovation (DRI) du Ministère, est disponible sur le site du PREDIT : <http://www.predit.prd.fr/>.

7. Comme cela a été annoncé dans le préambule, à l'issue de la publication du présent rapport, le développement (*stricto sensu*) de MobiSim devrait marquer une phase de pause, d'une durée approximative de un an. Cela ne signifie pas que la recherche associée au projet s'arrête ; au contraire, le programme étant aujourd'hui opérationnel dans une nouvelle version, il convient désormais de l'utiliser et de multiplier les applications sur des terrains d'études diversifiés, afin d'utiliser les résultats et leur critique comme une sources de maturation et d'objectivation pour les développements futurs, qui devraient reprendre durant l'hiver 2012/2013. Cette étape d'utilisation et d'application est à l'origine du projet VILMODes, proposé en collaboration avec le LET (Laboratoire d'économie des transports ; UMR 5593 du CNRS, de l'Ecole nationale des travaux publics de l'Etat et de l'Université de Lyon 2) et le LVMT (Laboratoire ville, mobilité transport ; UMR-T 9404 commune à l'IFFSTAR, l'Ecole des ponts et l'Université Paris-Est de Marne-la-Vallée) en réponse à l'appel à proposition "Dynamiques de localisation et mobilité à l'horizon 2025. Prospective, politiques et outils" du PREDIT en février 2011.

8. Notons que l'originalité de MobiSim ne relève pas de la considération individuelles de ces raisons (on trouverait plusieurs modèles équivalents dans la littérature publiée sur les modèles LUTI), mais de leur combinaison, du moins à notre connaissance.

1. Une intégration de la dimension comportementale, au niveau individuelle des agents, des stratégies de mobilité quotidienne, ainsi que des choix et des décisions en matière de mobilité résidentielle ;
2. Une résolution spatiale multiscalaire qui permet de dépasser le niveau agrégé des communes et des quartiers pour prendre en compte des processus qui interviennent à différentes échelles ;
3. Une dimension prospective fondée sur la méthode des scénarios qui permet de dépasser le calibrage des processus sur des périodes antérieures pour intégrer des dynamiques plus crédibles quant au développement des territoires.

ii. Architecture du modèle et du rapport

L'un des apports de la reprise du programme MobiSim par ThéMA a été de le réorganiser en modules permettant à la fois un développement "en parallèle" (plusieurs modules peuvent être modifiés simultanément) et une meilleure visibilité pédagogique du programme et de ses composants, donc de ses champs d'investigation et de ses capacités à répondre à une problématique donnée. Parmi ces modules, chacun assume un "morceau" de la modélisation complète, en amont, au cœur, ou en aval des processus simulés⁹. De ce fait, tous les modules n'ont pas une importance comparable : le développement de certains apparaît parfois prioritaire, alors que d'autres, n'intervenant que très indirectement dans la modélisation générale, peuvent faire l'objet d'un différé plus ou moins long (ou d'un développement associé à une demande spécifique). Dans ce contexte, l'architecture actuelle du programme MobiSim associe quatre grandes familles de modules¹⁰, portant chacun sur une problématique, un état de l'art et un type de modélisations différents :

– Les modules de données (D)

Les modules D sont consacrés à la modélisation des données. A partir de l'ontologie définie dans MobiSim, ils permettent de créer une base de données incluant les caractéristiques géographiques et socio-démographiques du territoire étudié, considéré selon une approche multiscalaire ;

– Les modules de processus (P)

Les modules P sont consacrés à la modélisation des processus. Ils permettent de simuler les mobilités quotidiennes (distribution et affectations des déplacements sur les réseaux de transport) et résidentielles (déménagements et évolution de la forme de la ville) en tenant compte de la dynamique de la population à court, moyen et long terme ;

– Les modules d'impact (I)

Les module I sont consacrés à la modélisation des impacts. Ils proposent un ensemble d'indicateurs, souvent fondés sur une modélisation, permettant d'évaluer les impacts des simulations effectuées, sur les trois sphères du développement durable (économique, sociale et environnementale) ;

9. Intégration et *stand-alone*

10. Parmi ces quatre familles de modules, et même s'ils sont fondamentalement indissociables les uns des autres, les module de modélisation des processus (modules P) constituent réellement le cœur du programme ; ils permettent de considérer, de formaliser et de simuler la dynamique du transport et de l'urbanisation : évolution de la population, mobilités quotidiennes, et mobilités résidentielles.

Table des matières

D Données <i>Data</i>		P Processus <i>Processes</i>		I Impacts <i>Impacts</i>		V Visualisation <i>Visualisation</i>	
D1	Population et logements <i>Population and housing</i>	P1	Evolutions démographiques <i>Demographic evolution</i>	I1	Indicateurs économiques <i>Economic indicators</i>	V1	Navigation <i>Navigation</i>
D2	Graphes et réseaux <i>Graphs and networks</i>	P2	Mobilités quotidiennes <i>Daily mobility</i>	I11	Congestion <i>Networks congestion</i>	V2	Discrétisation <i>Discretization</i>
D3	Aménités (péri)urbaines <i>(Peri)urban amenities</i>	P21	Distribution des mobilités <i>Mobility distribution</i>	I12	Accessibilité <i>Accessibilité</i>	V3	Cartes et graphiques <i>Maps and graphics</i>
		P22	Choix modal <i>Traffic modal-split</i>	I14	Coûts de fonctionnement <i>Functioning costs</i>		
		P23	Affectation sur les réseaux <i>Networks assignment</i>	I2	Indicateurs sociaux <i>Social indicators</i>		
		P3	Transport et fret urbain <i>Urban freight transportation</i>	I21	Satisfaction sociale <i>Social satisfaction</i>		
		P4	Mobilités résidentielles <i>Residential mobility</i>	I22	Équité socio-spatiale <i>Socio-spatial equity</i>		
		P41	Mobilités résidentielles <i>Residential mobility</i>	I23	Ségrégation / spécialisation <i>Segregation / specialization</i>		
		P42	Construction <i>Building</i>	I3	Indicateurs environnementaux <i>Environmental indicators</i>	V4	Géovisualisation <i>Geovisualization</i>
				I31	Emission de polluants <i>Pollutants emissions</i>		
				I32	Consommation énergétique <i>Energy consumption</i>		
				I33	Nuisance sonore <i>Noise pollution</i>		

J.P. Antoni
© ThéMA (2011)

Ce graphique présente un schéma théorique.
Tous les modules indiqués ne sont pas encore
implémentés dans le modèle.

FIGURE 0.1.: Organisation des modules MobiSim

– Les modules de visualisation (V)

Les modules V sont consacrés à la modélisation graphique. Encore en cours de développement pour certains, ils permettent de visualiser les résultats sous la forme de cartes et de graphiques (il intègre un sous-module de géovisualisation), et de les exporter dans différents formats.

L'ensemble s'organise hiérarchiquement, comme le montre la Figure 0.1, qui reprend globalement la structure présentée dans les précédents rapports MobiSim. Toutefois, pour les mêmes raisons que celles évoquées plus haut, cette structure a fait l'objet d'un certain nombre d'évolutions afin de s'adapter aux avancées du programme, en terme de logique de programmation comme de modélisation conceptuelle des mobilités.

Parallèlement, il convient de préciser que si les modules V sont aujourd'hui inscrits au calendrier du développement de MobiSim, ils ne sont pas décrits dans le présent rapport (certaines figures permettant néanmoins de visualiser les résultats qu'ils produisent). En effet, ils se fondent sur une bibliographie (*scientific background*) essentiellement liée aux questions de cartographie, de représentation graphique et de géovisualisation, et il aurait été fastidieux de les présenter ici en allongeant le rapport (par ailleurs déjà conséquent) par la description de méthodes et de techniques qui n'appartiennent pas directement au champ de l'urbanisation et des transports. De la même manière, il apparaît également important de préciser que si les modules de MobiSim sont développés *from scratch* pour répondre à des questions spécifiques selon une approche originale et propre au modèle, ils n'ont pas vocation à remplacer d'autres logiciels dont les fonctions répondent totalement ou en partie aux problèmes posés (il n'y aurait en effet aucun intérêt à redévelopper des logiciels qui existent déjà). Ici, c'est en quelque sorte le principe de subsidiarité qui s'applique et qui font des Systèmes d'information géographique (SIG), des Systèmes de gestion de bases de données relationnelles (SGBDR) et des logiciels de visualisation ou d'Analyse

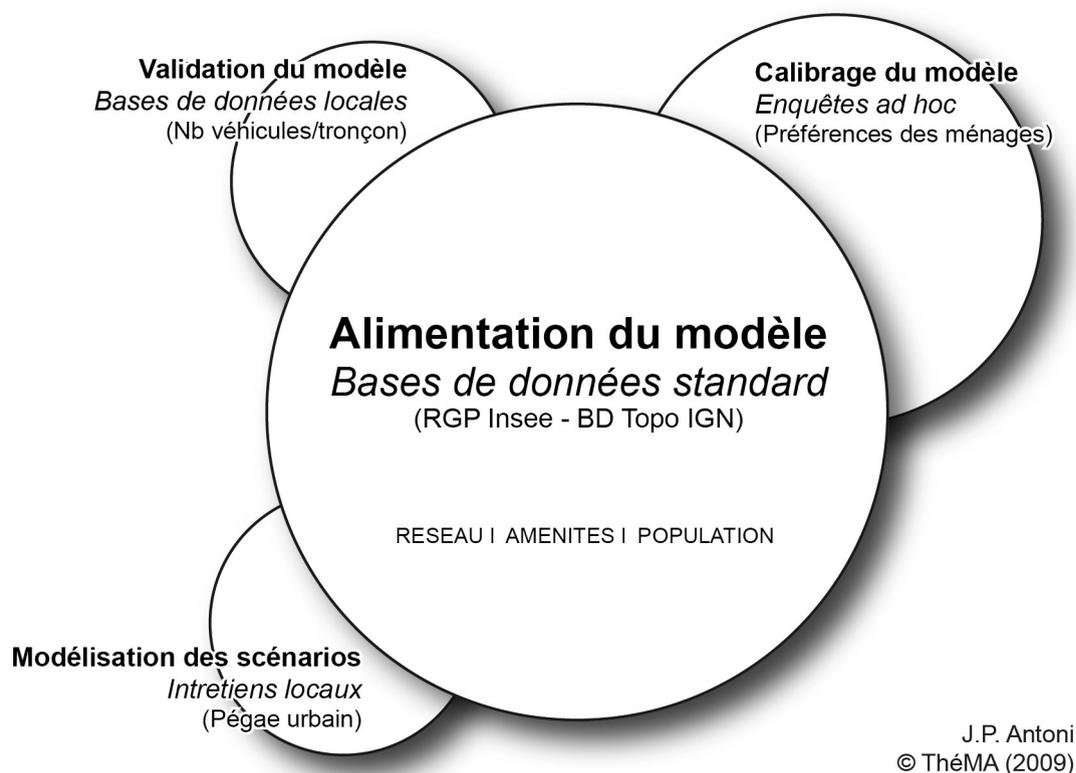


FIGURE 0.2.: Organisation des données dans MobiSim

exploratoire de données (EDA ou ESDA ; cf. Anselin, 1994)¹¹ des outils complémentaires indispensables à l'utilisation de MobiSim.

iii. Données et validation

La manipulation de données adéquates est un problème complexe, qui constitue souvent un écueil pour la modélisation en sciences humaines, tant sur le plan de l'acquisition des données que de leur exploitation pour le paramétrage et la validation des modèles. En effet, de nombreuses données indispensables au calibrage des modèles ne sont souvent que très difficilement disponibles, parfois abordables uniquement par l'intermédiaire d'enquêtes spécifiques. Pour pallier une partie de ce problème, MobiSim opère une distinction qui conduit à considérer quatre sphères de données. Comme l'indique la Figure 0.2, chacune fait référence à un type spécifique d'information et s'associe à une opération précise : alimentation, calibrage, validation et scénarisation des différents modèles.

– La sphère d'alimentation des modèles

Elle constitue le jeu de données de base pour construire l'état initial de l'espace étudié, et

11. L'EDA (*Exploratory data analysis*) et l'ESDA (*Exploratory spatial data analysis*) apparaissent particulièrement intéressantes pour manipuler des données complexes et à les modéliser, particulièrement si l'on dispose au départ d'un grand nombre de variables pour décrire la réalité. Elles s'associent ainsi à une démarche d'analyse des données qui utilise de nombreuses techniques (dont la plupart sont graphiques) de manière à maximiser la prise en compte croisée de ces données, à découvrir leur structure sous-jacente, à extraire les variables importantes, à mettre en lumière leurs anomalies, à tester des hypothèses, etc.

intègre des données standard concernant l'espace administratif et ses découpages, la population et ses caractéristiques socio-démographiques, des informations sur les réseaux, etc. Indispensables pour débiter une simulation, ces données doivent pouvoir être mobilisées sur n'importe quel terrain d'étude, et donc être disponibles de manière identique partout, du moins en France¹². Les données commercialisées par L'IGN et par l'INSEE répondent globalement à ces critères¹³, et permettent d'ouvrir un chantier MobiSim sur n'importe quel terrain d'étude national.

– **La sphère de calibrage des modèles**

Elle contient les données nécessaires pour calibrer le modèle, et sont liées à la description des comportements et des pratiques des individus. De par leur nature, elles ne sont donc pas accessibles dans un format standard, mais découlent de procédures d'acquisition *ad hoc*, des Enquêtes ménages-déplacements (EMD) par exemple. Une compulsions de la littérature permet ainsi de calibrer le modèle par défaut, à partir d'enquêtes nationales notamment, mais ce calibrage reste modifiable par l'utilisateur s'il dispose de données plus précises sur le terrain qu'il étudie¹⁴.

– **La sphère de validation des modèles**

Elle contient les données qui doivent permettre de mesurer les écarts entre les résultats produits par les modèles et la réalité observée. Il apparait en effet important, sur le plan de la validation des modèles, que les données ne soient pas les mêmes que celles qui ont servies à la calibrer, sans quoi la question ne fait que tourner en rond, à l'image du serpent qui se mord la queue. Autrement dit, un jeu de données externe au modèle doit permettre de valider les processus et les paramètres qui y sont intégrer Cette distinction, qui peut sembler anodine et triviale *a priori* relève en réalité du principe même de la méthode de la construction scientifique, telle qu'elle a été décrite par K. Popper. Plusieurs exemples dans le présent rapport illustrent ce problème et tentent d'y apporter une solution.

– **La sphère de scénarisation des modèles**

Cette sphère ne contient pas véritablement de données, mais plutôt une série d'informations liées aux scénarios à simuler avec MobiSim. L'ensemble des informations contenues ici touche donc à la teneur des scénarios, teneur qui n'est pas dénuée de dimensions politiques. En effet, si la modélisation concerne avant tout les modélisateurs, la mise en place des scénarios à simuler est souvent préparée par les édiles dans un contexte plus ou moins politique et dans le cadre d'un programme affiché ou non. Ainsi, on peut penser que ce sont des entretiens avec les édiles ou des experts, qui peuvent conduire à la

12. A titre d'information (nous ne reviendrons pas explicitement sur ce sujet dans le cadre de ce rapport, bien que quelques exemples permettront au lecteur de s'en douter), le projet MobiSim a ouvert deux nouveaux terrains d'étude majeurs : Strasbourg et Lille. Ce choix n'est pas à anodin car ces deux villes sont frontalières, ce qui est censé poser à un moment ou un autre, la question de savoir "ce qui se passe de l'autre côté", et donc de confronter le modèle à des données étrangères. Cette dimension internationale des données d'entrée est aujourd'hui considérée comme expérimentale.

13. sauf pour la question des systèmes de transport en commun. Pour ces données spécifiques, qui ne font l'objet d'aucune recension standardisée par les Etablissement publics de l'Etat, un protocole a été mis en place pour la saisie des données fournies par les Collectivités territoriales ou les Autorités organisatrices de transport dans des formats souvent très différents

14. Pour pallier ce problème, l'identification d'invariants (d'un espace à un autre) constitue un enjeu important de MobiSim, qui permettrait de limiter l'acquisition lourde de données par enquêtes, et de généraliser un certain nombre de constats quant aux pratiques de mobilité et aux choix résidentiels. Cet enjeu justifie en lui-même la multiplication des applications du modèle sur différents terrains d'étude.

constitution d'une base de scénarios.

Ce découpage des données en quatre sphères distinctes offre plusieurs avantages. *Primo*, il clarifie la manière avec laquelle les informations sont intégrées comme des *inputs* dans le programme, ce qui permet notamment de différencier les processus intégrés dans le code du programme et les données qui servent de paramètres ou de situation initiale modifiables par les utilisateurs¹⁵. *Secundo*, la hiérarchie introduite entre les sphères de données permet de distinguer celles qui sont indispensables au fonctionnement du modèle (données d'alimentation), de celles qui servent à le calibrer (et qui peuvent éventuellement être approchées par des dires d'experts ou par un calibrage réalisé sur un autre terrain d'étude, considéré comme "transférable"), ou encore de celles qui permettent d'introduire des scénarios, et qui relèvent plus du monde politique et du test scientifique d'hypothèses. Dans tous les cas, les données minimales (mais pas nécessairement suffisante) pour utiliser le modèle sur n'importe quel territoire de France métropolitaine sont ici identifiées. *Tertio*, la validation des modèles étant une opération difficile, nous partons du principe, dans l'utilisation comme dans la conception de MobiSim, que la multiplication des terrains d'étude, et par suite le test de la variabilité des réponses apportées par le modèle dans des contextes de départ (états initiaux) différents, peut contribuer à valider (ou au contraire à réfuter) la qualité des processus qui y sont intégrés.

iv. Itérations et simulations

La modélisation au sein de MobiSim s'organise globalement en trois grandes étapes qui permettent de simuler des scénarios et d'en évaluer les conséquences au regard de certains critères, actuellement considérés comme pertinents par rapport à la question du développement durable des territoires. Ces trois grandes étapes peuvent être présentées indépendamment les unes des autres, mais sont en réalité interconnectées, dans le mesure où la modification de l'une d'entre-elles influence nécessairement les deux autres :

– 1. Construction d'un cadre "agents/espace" synthétique

Cette étape se réfère essentiellement aux modules D et consiste à générer une population d'agents réaliste sur le territoire étudié, ainsi qu'un environnement dans lequel ils peuvent évoluer et prendre des décisions. Ces agents, dont les caractéristiques individuelles sont déduites des données fournies par les recensements de l'Insee, sont regroupés en ménages ; ces ménages sont associées à des caractéristiques qui proviennent des mêmes sources, ou qui émergent du niveau individuel des agents (c'est le cas notamment pour les revenus, rapportés ou non aux unités de consommation). L'environnement est quant à lui composé de bâtiments (résidentiels, commerciaux, industriels, administratif) qui contiennent la population résidente, les emplois et les activités, de réseaux de transport (routes et transport public) et d'aménités urbaines et périurbaines diverses. La population d'agents est dynamique : elle évolue chaque année et peut se recomposer en fonction des évènements qui affectent le cycle de vie des ménages.

15. Ce premier point peut sembler trivial aux lecteurs sensibilisés à la programmation informatique et à la manipulation de bases de données, mais il répond à un écueil identifié lors de l'expertise de MobiSim SMA, dans lequel certaines données de paramétrage ou certaines informations spécifiques à des territoires particuliers ont été intégrées, pour des raisons pragmatiques de performance informatique, dans le code du programme, c'est-à-dire "en dur".

– **2. Modélisation des mobilités quotidiennes**

Cette étape se réfère essentiellement aux modules P et consiste à modéliser la mobilité quotidiennes des agents dans leur environnement. Cette modélisation se fonde sur plusieurs étapes qui se réfère en premier lieu aux activités des agents et des ménages associées à leurs caractéristiques, qui permettent de construire un programme d'activité pour chaque agent. Les déplacements associés à ce programme d'activité peuvent alors être simulés avec un modèle (ou plutôt une série de modèles) qui se rapproche des modèles à quatre étapes, classiques pour ce genre d'opérations. Il permet d'implémenter dans MobiSim la question de la génération et de la distribution du trafic, du choix modal et de l'affectation du trafic sur les différents réseaux.

– **3. Modélisation des mobilités résidentielles**

Cette étape se réfère également aux modules P et consiste à modéliser les déménagement des ménages, en lien avec leurs préférences résidentielles. Cette modélisation fait évidemment intervenir les caractéristiques de l'environnement en termes d'offre en logements, d'aménités et d'accessibilité, mais également la propension des ménages à démanger, qui dépend en grande partie de leur composition et de leur caractéristiques. Enfin, le parc de logement y est intégré de manière dynamique dans la mesure ou des constructions nouvelles peuvent répondre à une demande de logement croissante, en lien avec les préférences de ménages. Ces nouvelles impactent alors la forme de la ville selon différentes modalités : urbanisation compacte, étalée, diffuse, etc.

Comme l'indique la Figure 0.3, ces trois étapes sont connectées et dépendantes les unes des autres : l'accessibilité et les nuisances associées à la mobilités quotidiennes, par exemple, modifient la qualité de vie et l'environnement résidentiel ; les migrations résidentielles modifient la répartition des flux et du trafic sur les routes et dans les réseaux de transport en commun, en même temps qu'elles change la structure résidentielle de l'aire urbaine étudiée, etc. Pour être prise en compte dans MobiSim, cette connexion nécessite d'utiliser successivement les modules du programme, selon un ordre qui permet de distinguer les phases d'initialisation du terrain d'étude (phases 1, 2 et 3) des phases de simulation de scénarios (phases 4, 5 et 6) et d'itération à plus ou moins long terme (phase(s) 7) :

1. Génération de la population synthétique (Module D1) afin d'initialiser le modèle au temps t en fixant le cadre agent/espace (agents, ménages et logements) ;
2. Génération des réseaux de transport (module D2) et des aménités urbaines et péri-urbaines (module D3) ;
3. Modélisation des mobilités quotidiennes (modules P2) afin d'initialiser le modèle au temps t en identifiant les caractéristiques des réseaux de transport (temps d'accès, congestion, etc.) ;
4. Evolution démographique (module P1) afin de simuler les modifications la population synthétique au temps $t+1$;
5. Modélisation des mobilités résidentielles (modules P4) afin de simuler les déménagements des ménages et les modification du parc de logements associées au temps $t+1$;
6. Modélisation des mobilités quotidiennes (modules P2) afin de simuler les modifications sur les réseaux de transport au temps $t+1$;
7. Réitération (n fois) des étapes 4, 5 et 6 pour la simulation des évolutions à $t+n$.

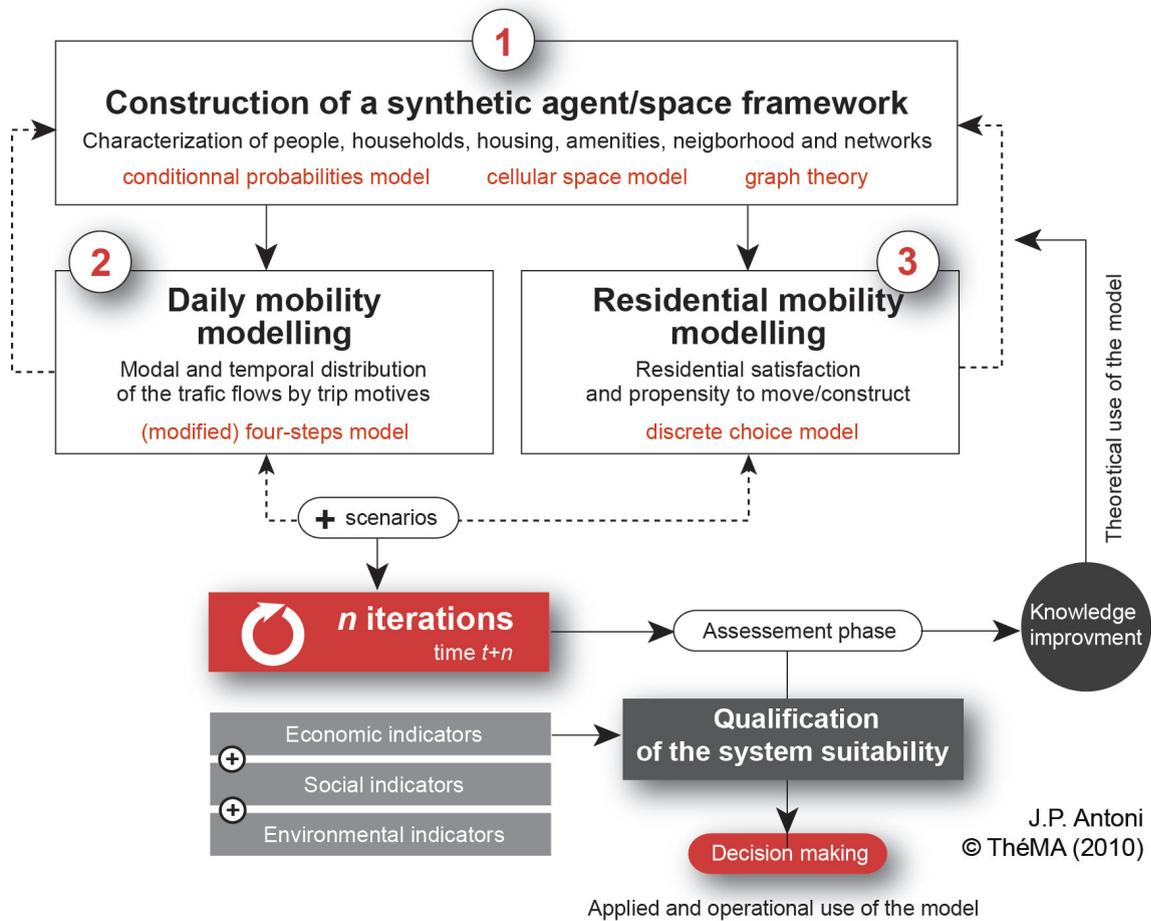


FIGURE 0.3.: Organisation des étapes de MobiSim

Au cours de chacune de ces étapes (initialisation, modélisation, itération), ce qui permet de tenir compte d'inflexions les scénarios simulés par le modèle, les paramètres utilisés pour modéliser le comportement ou la répartition des agents peuvent être modifiés. Ces modifications permettent d'introduire des scénarios dans le modèle, selon une logique de type *What-if* : que se passerait-il si l'on faisait cela ? Par exemple, à n'importe quelle étape de la modélisation, il est possible de modifier :

- le cadre agent/espace déterminé à la première étape en modifiant les caractéristiques de la population synthétique ou en introduisant de nouvelles infrastructures (rocade autoroutière, ligne de tramway, centre commercial, etc.) ;
- les mobilités quotidiennes en introduisant de nouveaux comportements de mobilité (désynchronisation des agendas, report modal, sensibilité à la rupture de charge ou à la problématique du stationnement, etc.) ou en changeant les caractéristiques fonctionnelles (coût, confort, etc.) des réseaux de transport ;
- les mobilités résidentielles en modifiant le parc de logement existant ou les caractéristiques de l'environnement résidentiel ou en simulant de nouveaux comportement liés par exemple à la recherche de nouvelles aménités ou à une volonté d'optimisation des conditions de déplacement.

Comme l'indique également la Figure 0.3, à l'issue de l'itération du modèle, les consé-

quences de ces modifications peuvent être évaluées par un certain nombre d'indicateurs (cf. les modules I présentés dans un point précédent). Ces indicateurs permettent de positionner les scénarios simulés en fonction d'enjeux spécifiques (que l'on résume ici par les trois sphères du développement durable : économique, sociale et environnementale). Dans l'état actuel du modèle, ces indicateurs sont considérés comme parallèles les uns aux autres, et rendent possible l'évaluation des scénarios dans le cadre d'une utilisation opérationnelle du modèle, qui fait de MobiSim un outil d'aide à la décision sur différentes thématiques, dont le nombre peut évoluer au fur et à mesure que de nouveaux indicateurs seront implémentés (et que les résultats exportés seront introduits pour le calcul d'indicateurs "en-dehors" de MobiSim). Mais parallèlement à cette utilisation du modèle comme un outil d'aide à la décision, il convient de rappeler que les résultats obtenus peuvent également être utilisés dans un contexte plus théorique, celui de la recherche en géographie, en socio-psychologie ou en transport. En effet, les *outputs* du modèle peuvent permettre de valider un certain nombre d'hypothèses implicitement ou explicitement prises en compte dans la formalisation des modèles proposés. Cette validation, pour autant qu'elle puisse être mesurée, contribue alors à une meilleure connaissance de la réalité et des processus qui y sont à l'œuvre, et permet d'introduire de nouvelles hypothèses dans le modèle de manière à ce qu'il serve comme un outil contribuant à la construction de la connaissance, selon la démarche proposée par Gilbert et Troitzsch (2005).

Deuxième partie .

**Modélisation des données
(Modules D)**

Bases de données et SIG

Table des matières

1. Population et logement (D1)

1. *Population et logement (D1)*

2. Graphes et réseaux (D2)

2. Graphes et réseaux (D2)

3. Aménités urbaines et périurbaines (D3)

3. Aménités urbaines et périurbaines (D3)

Troisième partie .

**Modélisation des processus
(Modules P)**

4. Evolutions démographiques (P1)

4. Evolutions démographiques (P1)

5. Distribution des mobilités (P21)

5. *Distribution des mobilités (P21)*

6. Choix modal (P22)

6. *Choix modal (P22)*

7. Affectation sur les réseaux (P23)

7. *Affectation sur les réseaux (P23)*

8. Mobilité résidentielle (P41)

8. *Mobilité résidentielle (P41)*

9. Construction (P42)

9. Construction (P42)

Quatrième partie .

**Modélisation des impacts
(Modules I)**

10. Congestion (I11)

10. Congestion (II)

11. Accessibilité (I12)

11. Accessibilité (I12)

12. Emissions de polluants (I31)

12. *Emissions de polluants (I31)*

13. Consommation énergétique (I32)

13. Consommation énergétique (I32)

14. Nuisances sonores (I33)

14. Nuisances sonores (I33)

Cinquième partie .

Conclusion

Systeme multi-agents ?

VILMODEs

Wiki

Anselin L., 1996, Interactive Techniques and Exploratory Spatial Data Analysis, Geographical Information Systems : Principles, Techniques, Management and Applications, Cambridge : Geoinformation International